第40卷 第4期
2023年4月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 40 No. 4
Apr. 2023

不同时间尺度海温因子对西北地区东部夏季降水的影响及预测

张 雯[1,2]， 马 阳[1,2]， 王 岱[1,2]， 杨建玲[1,3]， 崔 洋[1,3]

（1. 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室，宁夏 银川 750002；
2. 宁夏回族自治区气候中心，宁夏 银川 750002；3. 宁夏气象科学研究所，宁夏 银川 750002）

摘 要：利用1961—2020年中国西北地区东部夏季降水量月平均资料、NCEP/NCAR环流再分析以及英国Hadley逐月海表温度（SST）资料，采用功率谱、合成分析、多元线性回归等，分析了西北地区东部夏季年代际、年际降水分量的主导海温模态，并利用时间尺度分离前后得到海温因子分别建立降水预测模型。结果表明：（1）西北地区东部夏季降水不仅具有30 a左右的年代际震荡周期，还具有准3 a的年际周期，其中降水的年代际分量由太平洋十年际涛动（IPO）主导，春、夏季IPO正位相时，有利于西北地区东部夏季降水处于偏多的背景；反之，处于降水偏少背景。（2）降水年际分量的主导信号来自热带印度洋、热带西太平洋和北大西洋，当春季热带印度洋呈类全区一致海温模（IOBW）负（正）位相、类北大西洋三极子（NAT）为正（负）位相及热带西太平洋为冷（暖）海温异常时，有利于夏季中高纬贝加尔湖地区出现高（低）压异常，西太平洋副热带高压偏弱（强）、偏南（北），西北地区东部降水易偏少（多）。（3）独立检验时段内，基于时间尺度分离模型的西北地区东部夏季降水年均趋势异常综合评分（Ps）、符号一致率评分（Pc）分别较原始模型提高6%、7%，具有一定的预测能力。

关键词：时间尺度分离；海温模态；西北地区东部；降水预测

我国西北地区东部位于东亚内陆腹地，青藏高原边坡地带，属干旱半干旱温带大陆气候，水资源量少质弱，对自然降水依赖性强[1-2]。因而降水的异常变化可能引起区域内生态环境改变[3-4]，在全球变暖和人类活动的双重影响下，异常降水的强度和频率不断增加[5-7]，区域生态保护和高质量发展对短期气候预测水平的要求随之提高，这使得西北地区东部降水预测面临更为严峻的挑战。

气候变化不仅是气候系统内各圈层相互作用和大气内部动力过程的结果，也是多时空尺度现象[8]。由于西北地区东部处于季风区和非季风区分界地带，降水主要出现在夏季，天气气候同时受西风带、高原天气系统和东亚夏季风系统影响[9-10]，因此夏季降水也具有相当显著的年际变化[11-12]，维持着准3 a周期的特征[13-14]。此外，前人研究指出西北地区东部夏季降水还具有十分明显的年代际变化特征[15-16]，例如，其在1976年前后发生突变[17]；大气水汽含量在20世纪60年代中期前及80年代中期后较多，70年代前期较少[18]；90年代又进入降水相对较少的一个时期[19]。

不同时空尺度的变化，其物理本质并不完全一样，特别是不同时间尺度上，各时间分量间也存在相互影响[20-21]。陆日宇[22]指出，华北地区夏季降水在年代际、年际尺度上对应着明显不同的环流异常特征；Xu等[23]在讨论我国冬季降水与海平面气压场时，通过将年代际和年际变化分离开来，发现两者在不同时间尺度上对应关系并不一致；龚敬瑜等[24]对不同时间尺度的江淮梅雨期降水序列与海温异常的关系进行分析时，论证了海温对降水的多时空尺度作用；顾伟宗等[25]的研究表明，黄淮地区降水在年代际尺度上受北太平洋年代际振荡（Pacific Decadal Oscillation，PDO）影响，年际及以下尺度上

收稿日期：2022-09-06； **修订日期：**2022-12-04
基金项目：宁夏自然科学基金（2022AAC03674，2022AAC05065）；中国气象局科技创新发展专项（CXFZ2021J024）
作者简介：张雯（1990-），女，硕士，工程师，主要从事短期气候预测、气候变化研究. E-mail: acaimeme@sina.cn
通讯作者：王岱. E-mail: wangd123@126.com

由印度洋北部海温异常决定,而利用后者作为预测因子建立的模型对年际降水变率有一定提高。从前期信号中找出有效预报因子,并建立其与气候变量之间的统计关系,是目前短期气候预测常用的统计方法[26-27];彭京备等[28]以雪盖和海温的年际、年代际分量等作为预报因子建立的预测模型对我国夏季降水具备一定预报能力;基于时间尺度分离的统计降尺度模型同样能够提高华北地区夏季降水的预测水平[29]。

在短期气候预测业务中利用较长时间序列进行分析时,其中无可避免地包含不同时间尺度的信息,特别是针对年际变率进行预测时,如果仅分析与降水原始序列相关的海温异常,其中可能混杂着多时间尺度影响降水异常的因子,即会出现某些外强迫信号预测指示意义不明显的问题,从而使降水预测及成因分析的难度增加。因此,本文以不同时间尺度为着眼点,将我国西北地区东部夏季降水变化中的年代际和年际变化分量分开,明确不同时间尺度内主导降水变化的海温模态,加深对于西北地区东部夏季降水异常成因的认识,同时建立基于时间尺度分离的海温预测模型,以期为区域短期降水预测提供一定参考。

1　数据与方法

1.1　资料

本文所用资料包括:(1) 中国气象局国家气象信息中心整编的1961—2020年夏季(6—8月)我国西北地区东部(陕西、宁夏、甘肃及内蒙古西部地区)共计155个气象观测站的月平均降水量数据,该区域降水基本属于同一个气候分区[30];(2) 美国国家环境预测中心和美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)提供的第一版本月平均环流再分析资料[31],水平分辨率为2.5°×2.5°,包括位势高度场、风场;(3) 英国气象局Hadley中心提供的海表温度(Sea Surface Temperature, SST)资料[32],分辨率为1.0°×1.0°;(4)美国国家海洋和大气管理局(NOAA)地球系统研究实验室(ESRL)物理科学实验室(PSL)基于HADISST 1.1计算的1870—2015年逐月太平洋十年际涛动(Interdecadal Pacific Oscillation, IPO)指数[33],其中春季IPO年代际变化序列由逐年3—5月IPO平均值进行低通滤波处理后得到。用于计算各物理量的气候基准态取为1961—2020年平均值。

1.2　方法

由于本文主要基于不同时间尺度展开,因此首先采用功率谱分析,明确西北地区东部夏季降水原始时序中的年代际、年际振荡周期,确定不同时间尺度的降水变化规律。根据所确定的年代际周期,以低通滤波提取相应周期的降水年代际变化分量,采用合成分析确定影响降水年代际变化的海温模态;同样地,采用高通滤波提取年际变化分量,在筛选降水分量异常年的基础上,相应地对海温、大气环流距平场进行高通滤波,剔除年代际信号的影响,而后再次对异常年进行合成,据此得到不同时间尺度的关键海温区及主导海温模态。

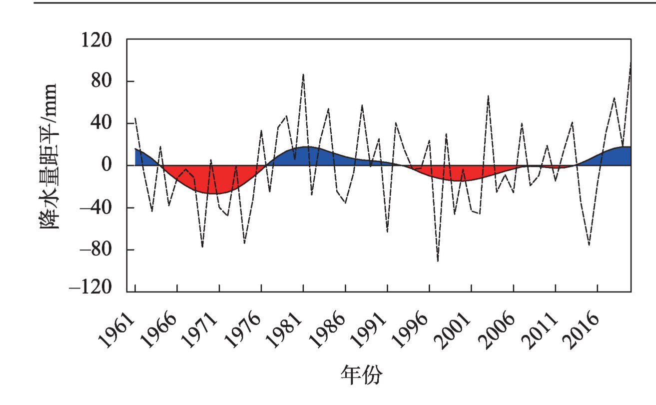
为比较时间尺度分离与否的预测效果,以原始海温前兆因子和经时间尺度分离得到的海温因子分别建立两套西北地区东部155站夏季降水多元回归预测模型,利用我国现行短期气候预测业务中使用的趋势异常综合评分(Ps)、符号一致率评分(Pc)等方法[34]比较2个预测模型的应用效果。

2　西北地区东部夏季降水年代际变化

对1961—2020年西北地区东部区域平均夏季降水时间序列进行功率谱分析,结果表明西北地区东部夏季降水具有3 a、30 a左右的周期(图略),其中准3 a为降水的年际振荡周期,也是西北地区降水量最显著的周期之一[35],准30 a则为年代际尺度内的振荡周期。

滤波处理可以突出强调不同时间尺度的信号,为提取西北地区东部夏季降水的年代际变化分量,对1961—2020年夏季降水量距平进行低通滤波(截断频率为1/30)得到年代际尺度的降水序列。由图1可知,降水总体上呈“旱-涝-旱-涝”的变化规律,即1963—1977年和1994—2012年以降水偏少为主,1978—1993年和2013—2020年以偏多为主。此外,需要注意的是西北地区东部夏季降水在1976年/1977年由“旱”转“涝”,其时间节点与PDO年代际突变时间基本一致[36-37]。

为确定年代际尺度内西北地区东部夏季降水的特征,对降水年代际分量进行标准化处理,以超过0.5的绝对值作为“旱期”(降水偏少时期)、“涝期”(降水偏多时期)的选取标准。据此,“旱期”进



注：蓝/红色填充部分代表降水量距平大于/小于0。

图1 1961—2020年西北地区东部夏季降水量距平及低通滤波

Fig. 1 The summer precipitation anomalies and low-pass filtering over the east part of Northwest China from 1961 to 2020

一步明确为1966—1975年和1996—2003年、"涝期"为1978—1988年和2015—2020年(表1)。"旱期"、"涝期"平均降水量分别为228.0 mm、270.3 mm，且"涝期"、"旱期"降水量差异达42.3 mm，这对于西北地区东部这样降水基数整体较少的地区而言，意味着降水在不同年代际背景内存在着明显的差异。此外，"旱期"、"涝期"的标准差分别为40.6 mm、47.0 mm，即"涝期"内降水年际变率更大，异常变化幅度更明显。

表1 西北地区东部夏季"旱期"、"涝期"降水特征量

Tab. 1 The summer precipitation characteristics during the drought and flood period over the east part of Northwest China

	"旱"、"涝"年数/a	平均降水量/mm	标准差/mm
"旱期"(1966—1975年，1996—2003年)	18	228.0	40.6
"涝期"(1978—1988年，2015—2020年)	17	270.3	47.0

根据表1中西北地区东部夏季"旱期"、"涝期"，分别对各时期内前期春季及同期夏季的全球海温距平场进行合成，探究影响西北地区东部夏季降水年代际分量的主导海温模态。"旱期"春季(图2a)，太平洋海温异常自北向南呈"暖、冷、暖"三极子型分布特征，其中北太平洋中西部(25°N~50°N，120°E~150°W)为暖海温异常，热带地区中东赤道太平洋(10°S~10°N，180°W~90°W)为冷海温异常，另一处暖海温异常位于南半球澳大利亚东侧(15°S~50°S，150°E~160°W)，表现为IPO[38-39]负位相特征。"旱期"夏季(图2b)，太平洋三极子型的海温异常分布较春季未出现明显变化，IPO负位相维持。

"涝期"(图2c、图2d)，太平洋海温异常与"旱期"呈反位相，北太平洋中西部为异常显著的冷海温，北美大陆东侧沿岸及热带中东太平洋为暖海温异常，南半球日界线东侧为显著的冷海温异常，太平洋自北向南呈"冷、暖、冷"的IPO正位相特征，且这种特征由春季持续至夏季。对此，计算滤波(截断频率为1/30)后的春季(3—5月)平均IPO指数与西北地区东部夏季降水年代际分量的相关性，两者相关系数为0.46，通过95%显著性检验，表明西北地区东部夏季降水的年代际分量与IPO关系密切。

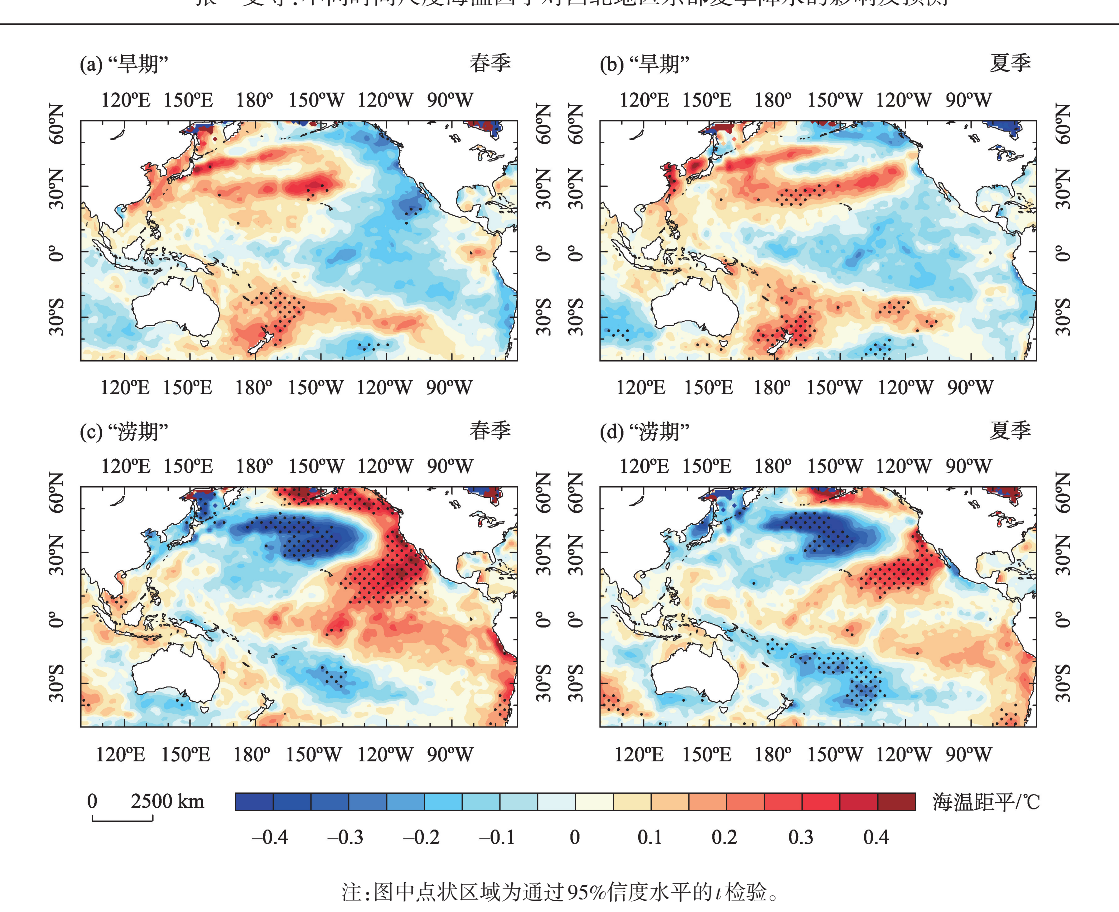
另外，北太平洋"西北冷、东南暖"的PDO特征同样显著，特别是"涝期"春、夏季通过信度检验的区域范围相对于"旱期"更大、海温异常程度也更强，即IPO或PDO正(负)位相时期，西北地区异常偏多(少)，与前人的研究结论一致[40]。

上述分析表明，西北地区东部夏季降水背景场主要由年代际尺度的IPO海温模态主导，春、夏季IPO维持正位相特征时，有利于西北地区东部夏季降水处于偏多的背景；反之，春、夏季IPO呈负位相时，有利于降水处于偏少背景，其中PDO在"涝期"更显著，一定程度上表现出PDO在不同降水背景下的非对称作用，但总体上年代际尺度的海温信号仍以太平洋IPO为主。

3 西北地区东部夏季降水年际变化

原始降水序列中既有年代际变化，又有年际变化，且这2种尺度的信号通常混合在一起。因此在讨论降水年际变化时剔除年代际的变化，将年际与年代际变化分量分离，强调年际尺度(10 a以内)的信号。

与前文处理方法相似，首先采用高通滤波(截断频率为1/3)提取周期为3 a左右的降水年际变化分量，以降水年际变化分量中超过1倍标准差的绝对值定义降水年际分量异常偏多、偏少年。因此，达到标准的降水偏多年为1964年、1970年、1973年、1976年、1981年、1990年、1992年、1996年、1998年、2003年、2007年和2020年(共12 a)；偏少年为1969年、1977年、1980年、1982年、1989年、1991年、



注:图中点状区域为通过95%信度水平的t检验。

图2　西北地区东部夏季降水"旱期"(a、b)、"涝期"(c、d)的春季(a、c)、夏季(b、d)海温距平合成分布

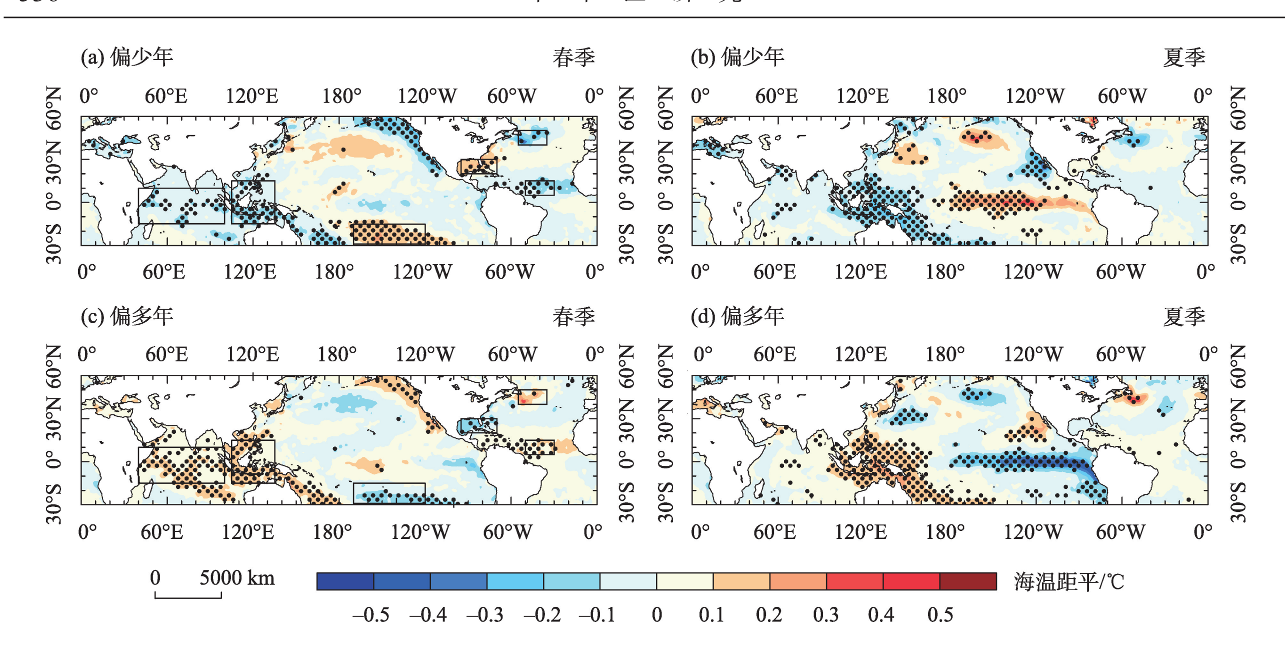
Fig. 2　Composites of SSTa for the drought period (a, b) and flood period (c, d) in spring (a, c) and summer(b, d) over the east part of Northwest China

1997年、1999年、2002年、2004年和2019年(共11 a)。对海温和环流距平场同样进行高通滤波,并在上述降水异常年中进行合成,以了解剔除年代际分量后独立影响降水的海温、大气年际分量特征。

图3是基于西北地区东部夏季降水年际分量的前期春季、同期夏季海温异常。降水异常偏少年春季(图3a),赤道中东太平洋为弱的冷海温异常,北太平洋暖海温异常主要位于日界线附近(30°N~40°N,140°E~140°W),其东北侧为显著的冷海温异常,南太平洋日界线东侧存在一显著的暖海温异常区,总体上太平洋表现为弱的IPO负位相特征;赤道西太平洋及赤道印度洋均为显著的冷海温异常;大西洋自北向南呈"冷、暖、冷"的海温分布型,与北大西洋三极子海温模态(North Atlantic Tripole, NAT)正位相分布特征相似,但其中低纬的"暖、冷"海温异常区位置较NAT更偏西。夏季(图3b),海温异常关键区较春季有明显调整,其中北太平洋亲潮区(20°N~40°N,140°E~170°E)为暖海温异常,赤道太平洋呈"西冷、中东暖"的El Niño海温异常分布特征,且均通过95%显著性检验;而印度洋和大西洋异常海温信号则较春季明显减弱。

降水异常偏多年春季(图3c)与偏少年春季(图3a)海温异常呈反位相分布,即北太平洋海温异常整体不明显,南太平洋为显著的冷海温异常,IPO正位相特征较弱,异常显著的海温信号主要集中在印度洋至西太平洋一带,均为暖异常,其中印度洋海温异常表现为全区一致海温模态(Indian Ocean Basin-wide Mode, IOBW)正位相特征;北大西洋海温呈"暖、冷、暖"这种类似于NAT弱负位相的状态。夏季(图3d),赤道中东太平洋冷海温异常十分显著,赤道太平洋西侧暖池区为显著的暖海温异常,赤道太平洋为典型的La Niña型海温异常;印度洋、大西洋几乎无海温年际信号。

上述分析表明,主导西北地区东部夏季降水年际分量的前兆信号可能来自热带印度洋、热带西太平洋、北大西洋和南太平洋,其中IOBW负(正)位相、类NAT正(负)位相、热带西太平洋冷(暖)海温异常以及南太平洋暖(冷)海温异常有利于西北地



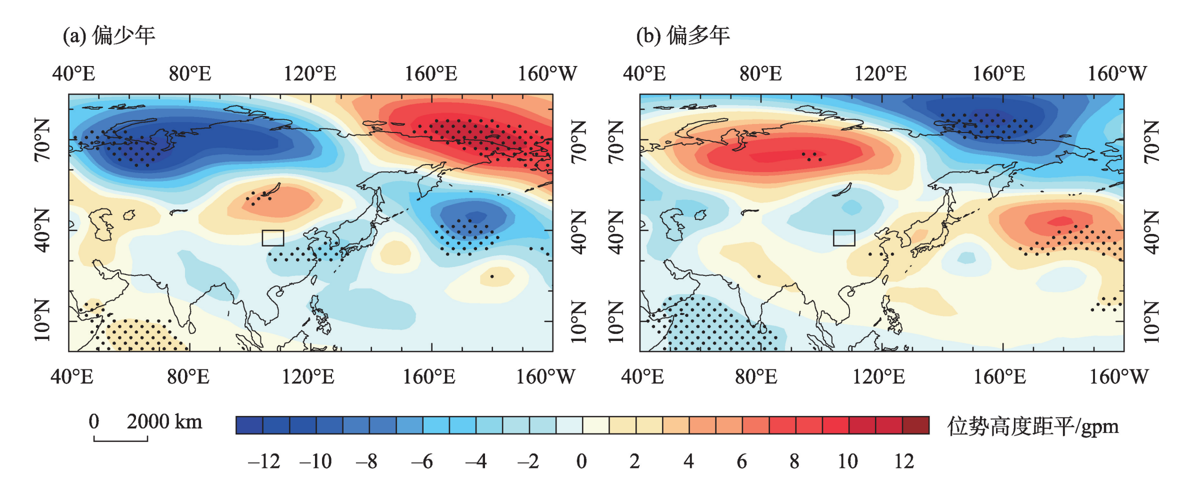
注:点状区域为通过95%信度水平的t检验,黑色框线区域为前期海温异常关键区域。

图3 西北地区东部夏季降水年际分量异常偏少年(a、b)、偏多年(c、d)春季(a、c)、夏季(b、d)海温距平合成分布

Fig. 3 Composites of SSTa interannual variations for the drought years (a, b) and flood years (c, d) over the east part of Northwest China in spring (a, c) and summer (b, d)

区东部夏季降水年际分量偏少(多),而南太平洋关键区海温异常可能在一定程度上反映IPO对年际海温异常的影响[33,41];同期夏季,则主要受赤道太平洋海温异常的影响,El Niño和La Niña分别有利于降水偏少和偏多。

大气环流异常是直接导致降水异常的原因,为探究年际尺度上环流变化与西北地区夏季降水的关系,图4给出降水年际分量异常年同期夏季500 hPa位势高度距平合成场。降水偏少年夏季(图4a),欧亚大陆中高纬新地岛附近、贝加尔湖至我国东北以及副热带西太平洋上空位势高度异常分别呈"负、正、负",且大部区域通过95%显著性检验,即欧亚地区中高纬自西向东表现为东传的纬向遥相关波列,该波列可能由大西洋海温强迫激发,影响着中高纬地区的环流系统[42-43]。此时,乌拉尔山高压脊偏弱,巴尔喀什湖至贝加尔湖一带为高压异常控制,由极地南下至中纬度地区的冷空气势力相对较弱;受春、夏季印度洋冷海温影响(图3a、图



注:点状区域为通过95%信度水平的t检验,黑色实框为西北地区东部区域。

图4 西北地区东部夏季降水年际分量异常偏少年(a)、偏多年(b)夏季500 hPa位势高度距平合成分布

Fig. 4 Composites of 500 hPa geopotential height anomalies interannual variations for the drought years (a) and flood years (b) over the east part of Northwest China in summer

3b),西太平洋副热带高压强度整体偏弱[44-45],水汽输送条件较差,因此不利于西北地区东部夏季降水异常偏多。

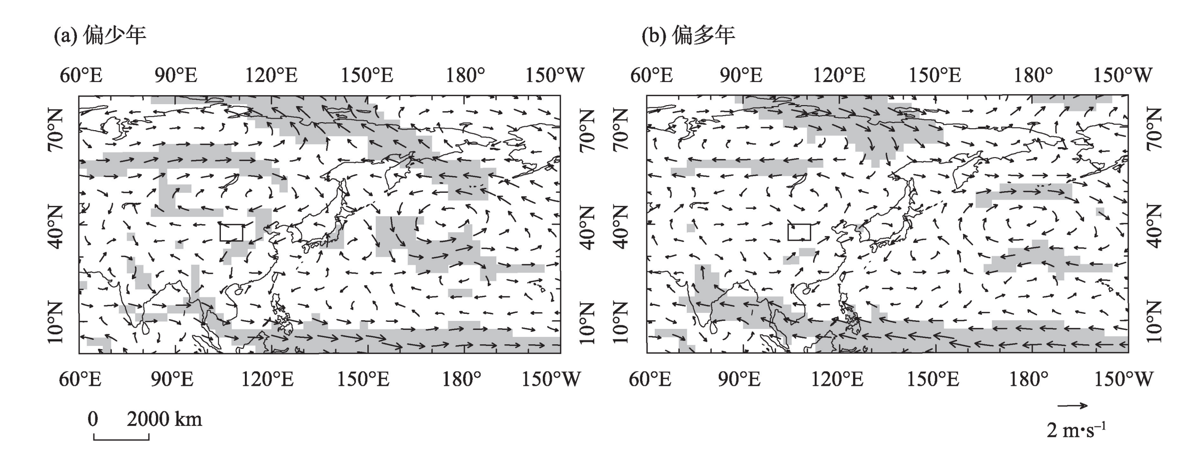
偏多年夏季(图4d),欧亚中高纬新地岛附近、贝加尔湖至我国东北以及副热带西太平洋等环流关键区上空位势高度异常与偏少年基本相反,呈"正、负、正"分布特征,表明乌拉尔山高压脊偏强、偏东,巴尔喀什湖至贝加尔湖一带为异常低压,受印度洋偏暖影响(图3c、图3d),西太平洋副热带高压偏强,且位置偏西、偏北,我国中高纬地区为"西低东高"分布型,冷空气通过乌拉尔山高压脊南下,经贝加尔湖地区低值系统向南、向东输送,西北地区东部正位于副热带高压西侧边缘地带,受到上述两系统共同影响,易造成降水偏多。

图5进一步给出西北地区东部夏季降水年际分量异常年低层700 hPa风场异常。降水偏少年夏季(图5a),贝加尔湖东侧为反气旋性环流异常,西北地区东部受偏东北风影响,但该东北风异常由大陆反气旋环流带下,并非来自西太平洋,因此水汽条件不足,不利于降水异常。偏多年夏季(图5b),我国东部至日本南部上空为一反气旋性环流异常,其中心位置大致位于35°N、130°E,同时热带东风异常十分显著,该气流在75°E附近向北输送,而后转向东,并汇入我国东部至日本南部上空的反气旋环流异常,西北地区东部则位于该反气旋环流异常西侧,此支气流来自太平洋较湿润,一定程度上有利于研究区夏季降水偏多。

4　基于时间尺度分离的西北地区东部夏季降水预测应用

综上所述,西北地区东部不同时间尺度的降水分量受到不同海温模态影响。为进一步体现时间尺度分离对区域年际降水异常的作用,本文利用原始降水时序同样进行前兆海温信号的筛选,并基于原始和时间尺度分离这两类海温异常信号分别作为预测因子,建立针对研究区内155个气象观测站的两套夏季降水预测模型,并根据短期气候预测业务需求,对其预测应用效果进行简要评估。

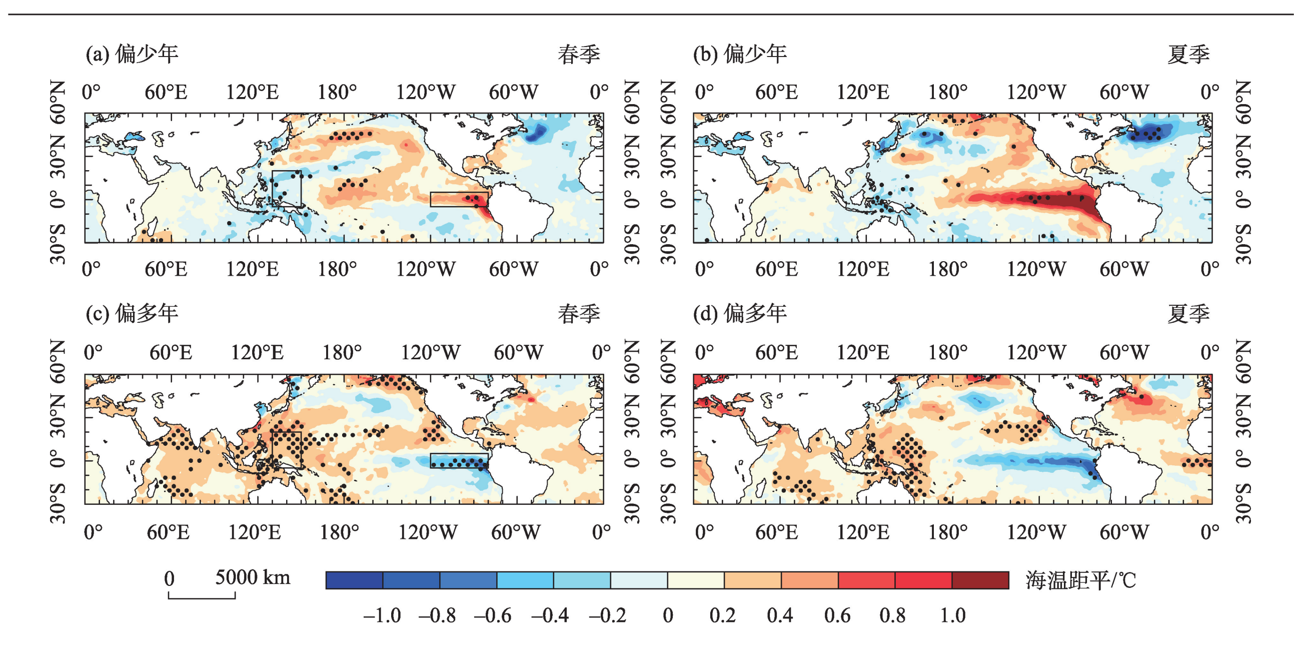
对西北地区东部夏季原始降水序列按降序排列,以降水距平偏多(少)的前5高(低)值来确定典型降水异常年。因此,降水异常偏少年为1969年、1974年、1991年、1997年、2015年,偏多年为1981年、1988年、2003年、2018年、2020年。为确定上述降水异常年的主要海温前兆因子,类似地,对这些异常年的海温距平进行合成。由图6可知,赤道东太平洋(5°S~5°N,120°W~80°W)、热带西北太平洋(5°S~20°N,130°E~150°E)均为前期海温关键区,即无论在降水异常偏多年(图6a)还是偏少年(图6c)的春季,上述关键区海温异常均十分显著,因此以区域平均海温异常构建原始前兆海温信号,分别称作赤道东太平洋海温指数(SSTI_1)、热带西北太平洋海温指数(SSTI_2)。需要注意的是,与基于时间尺度分离的海温年际分量场(图3)相比,尽管海温



注:阴影区域为通过90%信度水平的t检验,黑色实框为西北地区东部区域。

图5　西北地区东部夏季降水年际分量异常偏少年(a)、偏多年(b)700 hPa风场距平合成分布

Fig. 5　Composites of 700 hPa wind anomalies interannual variations for the drought years (a) and flood years (b) over the east part of Northwest China in summer



注:点状区域为通过95%信度水平的*t*检验,黑色框线区域为前期海温异常关键区域。

图6 西北地区东部夏季原始降水异常偏少年(a、b)、偏多年(c、d)春季(a、c)、夏季(b、d)海温距平合成分布

Fig. 6 Composites of 500 hPa geopotential height anomalies for the drought years (a, b) and flood years (c, d) over the east part of Northwest Chinain in spring (a, c) and summer (b, d)

年际分量与原始海温异常的空间分布具有一定的相似性,例如热带西太平洋海温区始终是关键海区,体现出年际变化在多时间尺度作用中的主要地位,但海温年际分量场中前期春季异常显著的类IOBW、类NAT型和南太平洋海温异常的海温模态(图3a、图3c)在原始海温合成场中并没有明显体现。

降水异常偏少年春季,SSTI_1为暖异常,SSTI_2为冷异常;偏多年春季,两项指数均与偏少年呈反位相,即SSTI_1、SSTI_2与西北地区东部夏季降水分别为负、正相关关系,但其相关系数均未通过显著性检验。西北地区东部夏季"旱期"SSTI_1、SSTI_2与降水距平的符号相反率、一致率分别为50%、61%;"涝期"为59%、53%,反映出两项指数在"旱期"、"涝期"的预测参考性不同,其中SSTI_1在"涝期"的符号相反率更高,而SSTI_2在"旱期"的一致率更高,指示性也相对更高。

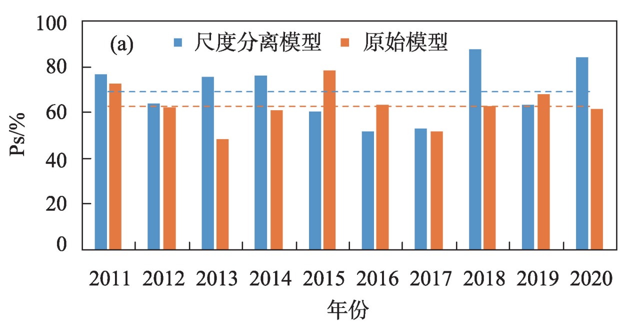
由于南太平洋海温异常一定程度上可能反映的是IPO年代际尺度的影响,因此基于海温年际分量可筛选出3个海温因子,分别来自热带印度洋(15°S~10°N,40°E~100°E)、热带西太平洋(15°S~15°N,105°E~135°E)和北大西洋(5°N~50°N,85°W~30°W),其中北大西洋海温指数由大西洋3个关键区海温距平标准化后共同建立(高纬区域-中纬区域+低纬区域)。为了方便,分别将它们称为热带印度洋指数(SSTI_3)、热带西太平洋指数(SSTI_4)及北大西洋海温指数(SSTI_5),3项海温指数与降水均为正相关关系,相关系数分别为0.32、0.42和0.48,均通过95%显著性检验,各项海温指数与降水距平的年际变化也表现出较好的趋势一致性(图略)。

西北地区东部夏季"旱期"3项海温指数的符号一致率均超过60%,其中降水与SSTI_3、SSTI_4的符号一致率均为67%,与SSTI_5的符号一致率为61%;"涝期"3项海温指数与降水的符号一致率为53%~65%,其中SSTI_5最高为65%,SSTI_4为次之59%,SSTI_3为53%。由此可知,基于时间尺度分离得到的海温年际分量在"旱期"、"涝期"内具有一定指示意义,特别是在"旱期"符号异常的一致性更高。

在考虑上述3项海温年际分量指数基础上,结合年代际尺度的IPO信号,对西北地区东部155个气象站建立基于时间尺度分离因子(3项年际海温指数和1项年代际海温指数)的夏季降水多元回归预测模型,称为尺度分离模型;为与基于原始海温因子建立的模型进行预测效果对比,以SSTI_1、SSTI_2同样建立多元回归预测模型,称为原始模型,建模时段为1961—2010年,独立检验时段为2011—2020年。

结合1961—2010年建模时段内两套降水预测模型的拟合信息,在西北地区东部范围内,通过计算155站降水预测序列与观测序列的相关系数,基于原始模型得到的155个相关系数中通过95%、99%信度检验的站数占比分别为35%、14%,研究区各站平均解释方差为6%;基于尺度分离模型得到的155个相关系数通过95%、99%信度检验的站数占比分别为84%、61%,平均解释方差为17%,均高于原始模型,预测拟合效果较原始模型明显提高。

以我国短期气候预测现行业务评分方法为标准,采用Ps、Pc方法对两套降水预测模型进行检验。由图7a可知,在独立检验时段的10 a中,基于尺度分离模型有7 a夏季降水Ps评分高于原始模型,年均Ps相对误差提高6%;年均Ps评分为69%,较原始预测模型(Ps评分63%)提高6%。另外,对于Pc评分而言,尺度分离模型同样也有7 a降水得分高于原始模型,年均Pc相对误差提高8%;年均Pc评分为54%,较原始预测模型(Pc评分47%)提高7%。上述结果表明,基于时间尺度分离建立的海温预测模型整体效果优于原始预测模型。因此,进行时间尺度分离是寻找外强迫因子的有效方法之一,由此建立的客观预测方法对短期气候预测也具有一定意义。



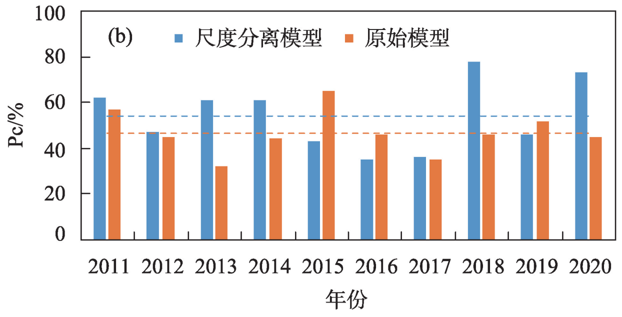


图7 2011—2020年基于尺度分离模型、原始模型的西北地区东部夏季降水Ps(a)、Pc(b)评分

Fig. 7 The Ps (a) and Pc (b) scores of summer precipitation over the east part of Northwest China based on scale separation model and original model from 2011 to 2020

当前,在短期气候预测业务中很难判断众多外强迫因子中哪些因子正在或即将发挥主要作用,本文以时间尺度分离为着眼点,对外强迫因子进行筛选,考虑了其背后可能存在的物理机制并初步建立了多元线性回归模型,旨在为短期气候预测提供参考依据。但气候系统是极其复杂的,不仅需要考虑不同时间尺度的相互作用,还需考虑众多因子之间协同、抵消等作用,气候及其变化是一个非线性耗散系统的状态和行为[46],不能仅以线性关系来描述。因此在探究包括海温在内的其他具有物理意义的外强迫信号基础上,考虑气候系统中非线性关系,发展客观预测方法,进一步完善和发展预测模型是另一项意义深远的工作。

5 结 论

利用1961—2020年我国西北地区东部夏季6—8月155个国家基准站降水量资料、NCEP/NCAR环流再分析以及英国Hadley逐月SST资料,采用时间尺度分离的方法,探究了主导西北地区东部夏季年代际、年际降水分量的海温模态,并利用上述海温模态提取前兆因子,构建基于时间尺度分离因子的西北地区东部夏季降水预测模型,并与未进行尺度分离的原始海温预测模型进行对比。主要结论如下:

(1)我国西北地区东部夏季降水具有显著的30 a左右年代际震荡周期,1961—2020年间降水总体呈现出“旱”-“涝”-“旱”-“涝”的变化特征,且“涝期”内降水异常变化的幅度更明显。西北地区东部夏季降水年代际分量主要由IPO主导,春、夏季IPO正位相时,有利于西北地区东部夏季降水处于偏多的背景;反之,IPO负位相时,降水年代际背景偏少。

(2)西北地区东部夏季降水还存在准3 a的年际震荡周期,通过时间尺度分离得到影响降水年际分量的主导信号来自春季赤道印度洋、赤道西太平洋和北大西洋,当春季类IOBW为负(正)位相、类NAT为正(负)位相及热带西太平洋为冷(暖)海温异常分布,对应于夏季中高纬贝加尔湖地区出现异常高(低)压,西太平洋副热带高压偏弱(强)、偏南(北)时,我国中高纬位势高度异常呈“西高东低”(“西低东高”),西北地区东部降水易偏少(多)。

(3)2011—2020年独立检验时段内,基于时间

尺度分离模型的西北地区东部夏季降水预测评分技巧较原始模型有明显提高，其中年均Ps、Pc相对误差分别提高6%、8%，年均Ps、Pc评分分别提高6%、7%。总体上，通过时间尺度分离得到的海温因子具有一定预测指示性，据此建立的降水模型预测准确率也相对更高。

参考文献(References):

[1] 黄建平, 季明霞, 刘玉芝, 等. 干旱半干旱区气候变化研究综述[J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(1): 9-14. [Huang Jianping, Ji Mingxia, Liu Yuzhi, et al. An overview of arid and semi-arid climate change[J]. Climate Change Research, 2013, 9(1): 9-14.]

[2] 刘晓东. 中国西部区域气候变化及其相关问题的研究[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1995. [Liu Xiaodong. Study on Regional Climate Change and Its Related Problems over Northwest China [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1995.]

[3] 安彬, 肖薇薇, 朱妮, 等. 近60 a黄土高原地区降水集中度与集中期时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2022, 39(5): 1333-1344. [An Bin, Xiao Weiwei, Zhu Ni, et al. Temporal and spatial variations of precipitation concentration degree and precipitation concentration period on the Loess Plateau from 1960 to 2019[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(5): 1333-1344.]

[4] 黄小燕, 李耀辉, 冯建英, 等. 中国西北地区降水量及极端干旱气候变化特征[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1359-1370. [Huang Xiaoyan, Li Yaohui, Feng Jianying, et al. Climate characteristics of precipitation and extreme drought events in Northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(5): 1359-1370.]

[5] 赵庆云, 张武, 王式功, 等. 西北地区东部干旱半干旱区极端降水事件的变化[J]. 中国沙漠, 2005, 25(6): 904-909. [Zhao Qingyun, Zhang Wu, Wang Shigong, et al. Change of extreme precipitation events in arid and semi-arid regions in the east of Northwest China[J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(6): 904-909.]

[6] 王素艳, 李欣, 王璠, 等. 宁夏降水资源格局演变特征[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 733-746. [Wang Suyan, Li Xin, Wang Fan, et al. Evolution characteristics of precipitation resources pattern in Ningxia[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(3): 733-746.]

[7] 杨金虎, 江志红, 王鹏祥, 等. 西北地区东部夏季极端降水量非均匀性特征[J]. 应用气象学报, 2008, 19(1): 111-115. [Yang Jinhu, Jiang Zhihong, Wang Pengxiang, et al. Intra-seasonal inhomogeneity of summer extreme precipitation in the east part of Northwest China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2008, 19(1): 111-115.]

[8] 魏凤英. 我国短期气候预测的物理基础及其预测思路[J]. 应用气象学报, 2011, 22(1): 1-11. [Wei Fengying. Physical basis of short-term climate prediction in China and short-term climate objective prediction methods[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2011, 22(1): 1-11.]

[9] 王宝鉴, 黄玉霞, 何金海, 等. 东亚夏季风期间水汽输送与西北干旱的关系[J]. 高原气象, 2004, 23(6): 912-918. [Wang Baojian, Huang Yuxia, He Jinhai, et al. Relation between vapour transportation in the period of east Asian summer monsoon and drought in Northwest China[J]. Plateau Meteorology, 2004, 23(6): 912-918.]

[10] 李栋梁, 邵鹏程, 王慧, 等. 中国东亚副热带夏季风北边缘带研究进展[J]. 高原气象, 2013, 32(1): 305-314. [Li Dongliang, Shao Pengcheng, Wang Hui, et al. Advances in research of the north boundary belt of East Asia subtropical summer monsoon in China [J]. Plateau Meteorology, 2013, 32(1): 305-314.]

[11] 李栋梁, 谢金南, 王文. 中国西北夏季降水特征及其异常研究[J]. 大气科学, 1997, 21(3): 331-340. [Li Dongliang, Xie Jinnan, Wang Wen. A study of summer precipitation features and anomaly in Northwest China[J]. Scientia Atmospherica Sinica, 1997, 21(3): 331-340.]

[12] 王雅琦, 冯娟, 李建平, 等. 西北地区东部夏季降水年际变化特征及其与环流的关系[J]. 高原气象, 2020, 39(2): 290-300. [Wang Yaqi, Feng Juan, Li Jianping, et al. Interannual variation of summer precipitation in the eastern of Northwest China and its relationship with circulation[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(2): 290-300.]

[13] 王澄海, 张晟宁, 李课臣, 等. 1961—2018年西北地区降水的变化特征[J]. 大气科学, 2021, 45(4): 713-724. [Wang Chenghai, Zhang Shengning, Li Kecheng, et al. Change characteristics of precipitation in Northwest China from 1961 to 2018[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2021, 45(4): 713-724.]

[14] 王秀荣, 徐祥德, 庞昕. 西北地区夏季降水异常的时空特征分析[J]. 气象科学, 2002, 22(4): 402-409. [Wang Xiurong, Xu Xiangde, Pang Xin. Analysis of summer precipitation time and spatial features in Northwest China[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2002, 22(4): 402-409.]

[15] 马镜娴, 戴彩娣. 西北地区东部降水量年际和年代际变化的若干特征[J]. 高原气象, 2000, 19(2): 166-171. [Ma Jingxian, Dai Caidi. Some characteristics of interannual and interdecadal changes in the eastern part of Northwest China[J]. Plateau Meteorology, 2000, 19(2): 166-171.]

[16] 马金龙, 庞雪琪, 杨建玲. 中国西北东部汛期降水主模态的年代际差异及其大气环流特征[J]. 干旱气象, 2017, 35(6): 940-948. [Ma Jinlong, Pang Xueqi, Yang Jianling. Interdecadal different of dominant modes of precipitation in rainy season over the eastern part of Northwest China and their corresponding atmospheric circulation characteristics[J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(6): 940-948.]

[17] 张智, 林莉, 梁培, 等. 陕甘宁及内蒙古西部地区夏季降水的异常气候特征[J]. 干旱区地理, 2009, 32(4): 527-531. [Zhang Zhi, Lin Li, Liang Pei, et al. Anomaly features of summer precipitation in eastern part of northwestern China and western inner Mongolia [J]. Arid Land Geography, 2009, 32(4): 527-531.]

[18] 王秀荣, 徐祥德, 苗秋菊. 西北地区夏季降水与大气水汽含量状况区域性特征[J]. 气候与环境研究, 2003, 8(1): 35-42. [Wang

Xiurong, Xu Xiangde, Miao Qiuju. Regional characteristics of summer precipitation and water vapor amount in Northwest China[J]. Climatic and Environmental Research, 2003, 8(1): 35-42.]

[19] 李飞. 西北地区东部夏季降水分布特征及其与夏季风关系研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018. [Li Fei. Distribution Characteristics of Summer Precipitation in the East Part of Northwest China and Its Relationship with Summer Monsoon[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.]

[20] Guo Y, Li J P, Li Y. A time-scale decomposition approach to statistically downscale summer rainfall over North China[J]. Journal of Climate, 2012, 25(2): 572-591.

[21] 平凡, 罗哲贤, 琚建华. 长江流域汛期降水年代际和年际尺度变化影响因子的差异[J]. 科学通报, 2006, 51(1): 104-109. [Ping Fan, Luo Zhexian, Ju Jianhua. Difference of influencing factors between interdecadal and interannual variations in summer precipitation over the Yangtze River Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(1): 104-109.]

[22] 陆日宇. 华北汛期降水量变化中年代际和年际尺度的分离[J]. 大气科学, 2002, 26(5): 611-624. [Lu Riyu. Separation of interannual and interdecadal variations of rainfall in North China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2002, 26(5): 611-624.]

[23] Xu J J, Chan J C L. Interannual and lnterdecadal variability of winter precipitation over China in relation to global sea level pressure anomalies[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2002, 19(5): 914-926.

[24] 龚敬瑜, 王谦谦. 江淮梅雨期降水不同尺度异常与SSTA的关系[J]. 大气科学学报, 2006, 29(5): 656-661. [Gong Jingyu, Wang Qianqian. Relationship between different multi- time scales of anomalous precipitation in Jiang-Huai Mei-yu and SSTA[J]. Journal of NanJing Institute of Meteorology, 2006, 29(5): 656-661.]

[25] 顾伟宗, 张莉, 伯忠凯, 等. 不同时间尺度上黄淮地区夏季降水异常成因及预测研究[J]. 大气科学学报, 2018, 41(3): 388-394. [Gu Weizong, Zhang Li, Bo Zhongkai, et al. Study on the causes and prediction of summer precipitation in the Huang-huai area on different time scales[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2018, 41(3): 388-394.]

[26] 郭彦, 李建平. 一种分离时间尺度的统计降尺度模型建立和应用——以华北汛期降水为例[J]. 大气科学, 2012, 36(2): 385-396. [Guo Yan, Li Jianping.Atime- scale decomposition statistical downscaling model: Case study of North China rainfall in rainy season [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2012, 36(2): 385-396.]

[27] 刘娜, 李双林. 基于时间尺度分离的中国东部夏季降水预测[J]. 应用气象学报, 2015, 26(3): 328-337. [Liu Na, Li Shuanglin. Short-term climate prediction for summer rainfall based on time-scale decomposition[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2015, 26(3): 328-337.]

[28] 彭京备, 陈烈庭, 张庆云. 多因子和多尺度合成中国夏季降水预测模型及预报试验[J]. 大气科学, 2006, 30(4): 596-608. [Peng Jingbei, Chen Lieting, Zhang Qingyun. The statistic prediction model and prediction experiments of the summer rain over China by multiple factors and multi scale variations[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2006, 30(4): 596-608.]

[29] 阮成卿, 李建平. 华北汛期降水分离时间尺度降尺度预测模型的改进[J]. 大气科学, 2016, 40(1): 215-226. [Ruan Chengqing, Li Jianping. An improvement in a time-scale decomposition statistical downscaling prediction model for summer rainfall over North China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2016, 40(1): 215-226.]

[30] 王素艳, 纳丽, 王璠, 等. 海冰和海温对西北地区中部6月降水异常的协同影响[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 63-72. [Wang Suyan, Na Li, Wang Fan, et al. Synergistic effects of ice and sea surface temperature on the precipitation abnormal in June in the central part of Northwest China[J]. Arid Land Geography, 2021, 44 (1): 63-72.]

[31] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1996, 77(3): 437-471.

[32] Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(D14): doi: 10.1029/2002JD002670.

[33] Henley B J, Gergis J, Karoly D J, et al. A triple index for the interdecadal Pacific oscillation[J]. Climate Dynamics, 2015, 45(11-12): 3077-3090.

[34] 陈桂英, 赵振国. 短期气候预测评估方法和业务初估[J]. 应用气象学报, 1998, 9(2): 178-185. [Chen Guiying, Zhao Zhenguo. Assessment methods of short range climate prediction and their operational application[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1998, 9(2): 178-185.]

[35] 白肇烨, 徐国昌. 中国西北天气[M]. 北京:气象出版社, 1991. [Bai Zhaoye, Xu Guochang. The Weather over Northwest China [M]. Beijing: Meteorological Press, 1991.]

[36] 于淑秋, 林学椿. 北太平洋海温的气候跃度及其对中国汛期降水的影响[J]. 热带气象学报, 1997, 13(3): 265-275. [Yu Shuqiu, Lin Xuechun. Climatic jump of north pacific SST and its effect on precipitation of floods season in China[J]. Journal of Tropical Meteorology, 1997, 13(3): 265-275.]

[37] 杨修群, 朱益民, 谢倩, 等. 太平洋年代际振荡的研究进展[J]. 大气科学, 2004, 28(6): 979-992. [Yang Xiuqun, Zhu Yimin, Xie Qian, et al. Advances in studies of Pacific decadal oscillation[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2004, 28(6): 979-992.]

[38] Parker D, Folland C, Scaife A, et al. Decadal to multidecadal variability and the climate change background[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112, D18115. doi: 10.1029/2007JD008411.

[39] Xu Y Y, Hu A X. How would the twenty-first-century warming influence Pacific decadal variability and its connection to north American rainfall: Assessment based on a revised procedure for the IPO/PDO[J]. Journal of Climate, 2018, 31: 1547-1563.

[40] 朱益民, 杨修群. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系[J].

气象学报, 2003, 61(6): 641−654. [Zhu Yimin, Yang Xiuqun. Relationships between Pacific Decadal Oscillation (PDO) and climate variabilities in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2003, 61(6): 641−654.]

[41] 王萌. 东南太平洋海温对低纬高原初夏降水的影响[D]. 昆明: 云南大学, 2018. [Wang Meng. Relationship between Precipitation over Low Latitude Plateau in Early Summer and Sea Surface Temperature in the Southeastern Pacific and the Possible Underlying Mechanisms[D]. Kunming: Yunnan University, 2018.]

[42] 卢国阳, 林纾, 王蕊, 等. 西北地区4月降水异常的环流特征及前兆海温信号[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1250−1260. [Lu Guoyang, Lin Shu, Wang Rui, et al. Anomalous circulation characteristics of precipitation anomalies in Northwest China in April and precursory SST signal[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1250−1260.]

[43] Wang H, Liu G, Chen J. Contribution of the tropical western Atlantic thermal conditions during the preceding winter to summer temperature anomalies over the lower reaches of the Yangtze River basin-Jiangnan region[J]. International Journal of Climatology, 2017, 37(13): 4631−4642.

[44] 袁媛, 李崇银. 热带印度洋海温异常不同模态对南海夏季风爆发的可能影响[J]. 大气科学, 2009, 33(2): 325−336. [Yuan Yuan, Li Chongyin. Possible impacts of the tropical Indian Ocean SST anomaly modes on the South China sea summer monsoon onset[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2009, 33(2): 325−336.]

[45] Yuan Y, Zhou W, Chan J C L, et al. Impacts of the basin-wide Indian Ocean SSTA on the South China sea summer monsoon onset[J]. International Journal of Climatology, 2008, 28(12): 1579−1587.

[46] 李崇银. 气候动力学引论(第二版)[M]. 北京: 气象出版社, 2000. [Li Chongyin. Introduction to Climate Dynamics[M]. 2nd ed. Beijing: Meteorological Press, 2000.]

The influence and prediction of SST predictors at different timescales on summer precipitation over the eastern part of Northwest China

ZHANG Wen[1,2], MA Yang[1,2], WANG Dai[1,2], YANG Jianling[1,3], CUI Yang[1,3]

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, China Meteorological Administration, Yinchuan 750002, Ningxia, China; 2. Ningxia Hui Autonomous Region Climate Center, Yinchuan 750002, Ningxia, China; 3. Ningxia Institute of Meteorological Sciences, Yinchuan 750002, Ningxia, China)

Abstract: The dominant sea surface temperature anomaly (SSTa) modes of decadal and interannual variations in summer precipitation over the eastern part of Northwest China (ENC) were here analyzed by power spectrum and composite analyses. The summer precipitation averaged at 155 stations over the ENC, the monthly SSTa, and circulation reanalysis data from 1961 to 2020 were used. The SSTa predictors before and after the timescale decomposition were obtained to establish precipitation prediction models by using linear regression. The results showed that the summer precipitation over the ENC has not only an decadal period of about 30 years but also a 3−year interannual cycle. The Pacific Decadal Oscillation (IPO) has played a leading role in decadal variations in summer precipitation. The positive phase of IPO in the precedent spring is conducive to more precipitation; meanwhile, it is in the background of less precipitation . The tropical Indian Ocean, the tropical western Pacific, and the North Atlantic provide interannual SSTa signals. The negative (positive) phase of tropical Indian Ocean SSTa, the positive (negative) phase of the Atlantic tripole SSTa, and the cold (warm) SSTa in the tropical western Pacific Ocean in the precedent spring, corresponding to the high (low) pressure anomalies over Lake Balkhash in mid- to high latitudes, with northward (southward) and weak (strong) characteristics in the subtropical High over the Western Pacific, favor less (more) summer precipitation over the ENC. Moreover, taking the decadal and interannual variations of SSTa into account can potentially contribute to improving forecasting of summer precipitation over the ENC, with the annual average Ps and Pc scores during the independent test samples based on the scale decomposition model being 6% and 7% higher than those in the original model, respectively.

Keywords: time-scale decomposition; sea surface temperature mode; the eastern part of Northwest China; precipitation prediction